



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche

Corso di Laurea Triennale in **INGEGNERIA MECCANICA**

“Risposta a Creep di un acciaio inossidabile AISI316L saldato per FSW”

Creep response of a stainless steel AISI316L welded by FSW

Relatore: Chiar.mo

Prof. **Stefano Spigarelli**

Tesi di Laurea di:

Censori Gianluca

A.A. 2023 / 2024

Indice

1.Introduzione	3
1.1 Il Creep.....	4
1.2 Il Materiale.....	6
1.3 Il Friction Stir-Welding	9
2. Procedure Sperimentali	12
2.1 Prove di Creep	13
2.2 Prove di Durezza	17
3. Risultati Sperimentali	24
3.1 Curve di Creep	25
3.2 Dipendenza della velocità minima di deformazione dalla tensione di prova	30
3.3 Prova di micro-durezza	35
3.4 Prova di Durezza	37
4.Conclusioni	39
5.Bibliografia e Riferimenti	41

1.Introduzione

Oggi nell'utilizzo di materiali metallici (e non) ad elevate temperature non può non essere presa in considerazione una proprietà come la resistenza allo scorrimento viscoso o creep.

L'elaborato ha come obiettivo quello di analizzare negli aspetti principali la risposta a creep di un acciaio inossidabile AiSi316L FSW e come risponde il materiale anche in termini di proprietà meccaniche, in particolare la durezza.

Grazie al tema proposto dal professor Spigarelli e alle visite nei Laboratori, ho potuto apprendere cosa c'è dietro a tutte le informazioni reperibili dalla letteratura e come poterle interpretare.

Nelle 2 prove svolte sono stati raccolti i dati provenienti dalla macchina in funzione del carico, dello sforzo applicato e della temperatura. Successivamente, nell'elaborazione dei dati si è cercato di capire quali fossero le caratteristiche da mettere in evidenza attraverso i diagrammi, che in seguito sono illustrati.

Con l'aiuto del dottor. Alberto Santoni, invece, abbiamo svolto la prova di micro-durezza Vickers e la prova di durezza sui provini che hanno subito la prova di Creep presso i laboratori di Metallurgia dell'Università, dalla quale abbiamo estrapolato altri dati e informazioni.

1.1 Il Creep

Lo scorrimento viscoso o creep è la deformazione permanente di un materiale sottoposto ad alte temperature per un dato intervallo di tempo, a sollecitazioni dovute ad un peso o a sforzi, in genere, costanti. [1]

Il Creep, nella maggior parte dei casi, è un fenomeno indesiderato e soprattutto da evitare. Questo riguarda principalmente materiali viscoelastici come appunto acciai, plastiche e anche il calcestruzzo. Infatti, la causa di tale fenomeno è da ricercarsi nella natura elasto-visco-plastica della risposta costitutiva di molte classi di materiale.

Alcuni processi ed anche alcuni trattamenti sfruttano i fenomeni di tipo diffusivo, la cui origine di tali fenomeni è legata alla possibilità di movimento che hanno le dislocazioni sia per scorrimento (in inglese glide) che per lo sviluppo e la presenza di moti non-conservativi.

Le dislocazioni sono ovviamente dei difetti di linea monodimensionali, che distinguiamo principalmente in:

- dislocazioni a spigolo;
- dislocazioni a vite;
- dislocazioni miste.

Le dislocazioni a spigolo, a temperatura ambiente, possono muoversi soltanto per glide lungo il piano determinato dal vettore di Burgers e dalla linea di dislocazione. Il vettore di Burgers è un metodo con cui caratterizzare l'orientazione e l'intensità di una dislocazione in un cristallo [2].

Lo scorrimento incrociato delle dislocazioni a vite (cross slip), è invece il meccanismo che permette alle dislocazioni, che ad un certo stadio della deformazione sono distribuite in maniera uniforme nel grano, di ricomporsi a forma di pareti che dividono porzioni di

grano relativamente libere da dislocazioni. Questi movimenti non richiedono particolari innalzamenti di temperatura. Esiste però un altro tipo di moto, il “salto” (climb), il quale consiste nel passaggio parziale o intero di una dislocazione a spigolo dal suo piano di scorrimento ad un piano parallelo. [3]

All’inizio del XX secolo grazie agli studi di Andrade, oltre ad aver scoperto che il creep era una caratteristica importantissima per tutti i materiali destinati alle applicazioni ingegneristiche, si comprese che lo stesso si attiva quando viene superato uno specifico valore della temperatura omologa C^* . Il valore da superare è 0.4 [1] [4] [5] [6].

La Temperatura omologa è definita con questa espressione:

$$C^* = \frac{T}{T_{fusione}}$$

dove T che rappresenta la temperatura di esercizio e T_f la temperatura di fusione.

1.2 Il Materiale

Come già accennato in precedenza, oggetto delle prove effettuate è l'acciaio AISI316L. Si tratta di un acciaio inossidabile standard. Gli acciai inossidabili sono leghe Fe-Cr e Fe-Cr-Ni caratterizzate soprattutto dalla presenza di Cromo, il quale dovrà costituire almeno il 10/12% della composizione chimica della lega per garantire un'ottima resistenza alla corrosione. Il carbonio è presente, nella versione low carbon, come in questo caso, in quantità molto basse. Altri elementi di lega che svolgono ruoli importanti sono sicuramente il Nichel e Molibdeno.

La composizione di queste tipologie di acciai può essere molto varia e infatti è stato provato che ci sono elementi che possono caratterizzare ogni singola lega detti austenitizzanti, che allargano il campo dell'austenite o elementi ferritizzanti, che restringono tale campo.

In base al tipo di microstruttura che si può ottenere facendo variare gli elementi di lega, gli acciai inossidabili sono classificabili in cinque macro-gruppi:

- ferritici;
- austenitici;
- martensitici;
- ferritico-austenitici (Duplex o bifasici);
- indurenti per precipitazione (PH, precipitation hardening alloy)

Gli acciai inossidabili austenitici, i quali spiccano soprattutto per la resistenza alla corrosione ed all'ossidazione, sono caratterizzati da una struttura CFC (cubica a facce centrate).

Le proprietà meccaniche di questi materiali sono contenute e generalmente non possono essere migliorate con trattamenti termici. Si lavorano per deformazione plastica a caldo e freddo ed hanno una buona saldabilità.

Presentano sforzi di rottura modesti e valori di sforzo di snervamento molto bassi, a cui però corrispondono valori elevati di tenacità. [7]

Tornando a considerare l'acciaio AISI316L, nella seguente figura ne vengono riportate le principali caratteristiche meccaniche, la composizione chimica della lega e anche le varie nomenclature disponibili.

NOMENCLATURE ALTERNATIVE

ASTM	EN	UNS	JIS
316L	1.4404	S31603	N/A

COMPOSIZIONE CHIMICA

316	Composizione Chimica – Valore massimo							
	C	Mn	Si	Cr	Ni	P	Mo	Other
	0.03	2.0	1.0	16.5-18.5	8-13	0.04	2-2.25	N<0.11
316	Valore Tipico							
	0.02	0	0	17.2	10.1	0	2.1	

CARATTERISTICHE MECCANICHE

Tensile Strength (MPa) min	Yield Strength 0.2% Proof (MPa) min	Elongation (% in 50mm) min	Hardness	
			Rockwell B (HR B) max	Brinell (HB) max
570-590	280-290	55	79	165

Figura 1.1: esempio di composizione chimica di un AISI316L e alcune caratteristiche meccaniche. [8]

L'AISI316L è quindi un acciaio inox austenitico al Cr-Ni-Mo, non temprabile, induribile mediante deformazioni a freddo e presenta una resistenza alla corrosione nettamente superiore rispetto agli acciai 304.

Inoltre, da come si rileva dalla tabella relativa alla composizione chimica, il basso valore di Carbonio lo rende poco sensibile alla corrosione inter-cristallina.

Essendo il 316L una sottoclasse del 316, può essere utilizzato in tutti gli impieghi dell'*AISI316* e in particolare dove la saldatura riveste un ruolo importante. Infatti, questa tipologia di acciai è destinata alle attrezzature per navi, serbatoi, scambiatori di calore, industrie chimiche e tessili.

1.3 Il Friction Stir-Welding

La Saldatura, nel suo concetto più generale, è un processo che permette di realizzare l'unione di due o più parti mediante l'apporto di calore (e in alcuni casi anche pressione) che porta alla fusione di porzioni del materiale stesso. Nella casistica più generale, suddividiamo i processi di saldatura in:

- Saldatura autogena, la quale corrisponde alla saldatura in cui si fonde il materiale delle parti da unire;
- Saldatura eterogenea o brasatura, che è realizzata con il materiale d'apporto, che subisce la fusione.

Denominazione italiana	Denominazione AWS	Sigla	ISO 4063
Ossiacetilenica	Oxyfuel Gas Welding	OFW	311
Elettrodo rivestito	Shielded Metal Arc Welding	SMAW	111
Arco sommerso	Submerged Arc Welding	SAW	121
MIG/MAG	Gas Metal Arc Welding	GMAW	131/135
TIG	Gas Tungsten Arc Welding	GTAW	141
Saldatura a plasma	Plasma Arc Welding	PAW	15
Elettroscoria	Electroslag Welding	ESW	72
Elettrogas	Electrogas Welding	EGW	73
Saldatura laser	Laser Beam Welding	LBW	52
Saldatura a fascio elettronico	Electron Beam Welding	EBW	51
Saldatura a resistenza	Resistance Welding	RW	21
Saldatura per attrito	Friction Stir Welding	FSW	42

Figura 1.2: Nella figura qui riportata i principali procedimenti di Saldatura con la denominazione italiana ISO 4063 e quella dell'AWS (American Welding Society). Fonte: [9]

Il *Friction Stir Welding*, sviluppato nel 1991 al The Welding Institute di Cambridge, è un metodo di saldatura allo stato solido, che, nonostante sia nato proprio per le leghe di alluminio, permette oggi la giunzione permanente di un'ampia gamma di geometrie e di materiali, tra cui leghe di magnesio, Inconel, sinterizzati, polimeri termoplastici e compositi a matrice metallica. [10]

Nell'utilizzo di questa tipologia di Saldatura rientrano tantissimi vantaggi come, ad esempio, la possibilità di saldare parti realizzate con materiali diversi oppure la possibile realizzazione di giunti saldati sia con lembi sovrapposti che no. Altro vantaggio è che può essere considerata parte integrante del settore delle green technology non solo per il rispetto ambientale, ma anche per l'efficienza energetica.

Facendo un confronto anche con le altre citate tipologie di saldature, essendo questa saldatura per frizione un processo allo stato solido, si incorre meno nelle problematiche relative a cricche, ritiri, porosità e tutte le tipologie di difetti, che sappiamo bene essere conseguenza dell'intrappolamento di gas nel metallo durante il processo.

Il principio su cui si basa il processo di Friction Stir-Welding è il rimescolamento allo stato solido del materiale, provocato dall'azione meccanica di un utensile messo in rotazione che viene fatto penetrare e avanzare in corrispondenza della linea di giunzione dei due lembi da saldare. L'attrito che si genera tra utensile in rotazione e pezzo provoca il riscaldamento del materiale da saldare, fino al raggiungimento di una condizione di elevata duttilità, che consente all'utensile di avanzare, rimescolando il materiale.

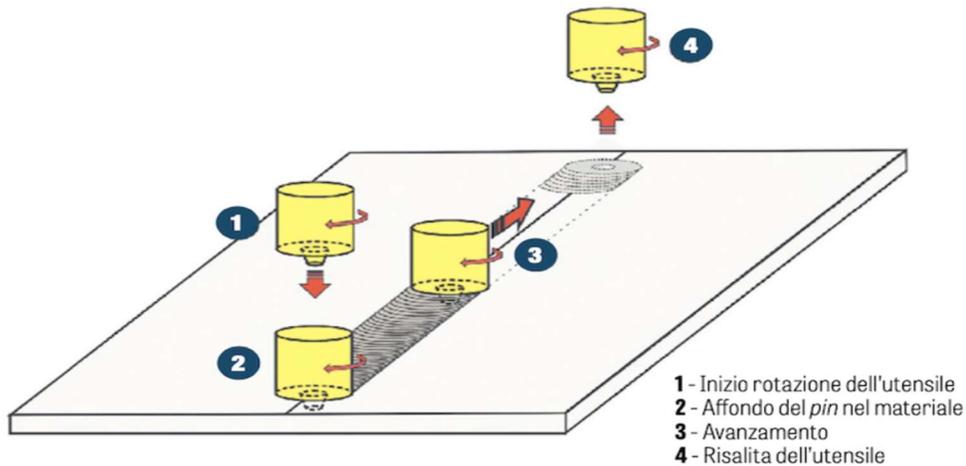


Figura 1.3: rappresentazione schematica del processo [10]

Dal momento che il materiale è rimescolato allo stato solido, questo tipo di saldatura è definita come saldatura a freddo, visto che la temperatura non raggiunge mai più del 75-80% del valore della temperatura di fusione.

Un fattore determinante è la tipologia di utensile che viene utilizzato. Vi sono tre tipi di utensile utilizzati: a pin fisso, regolabili e self-reacting.

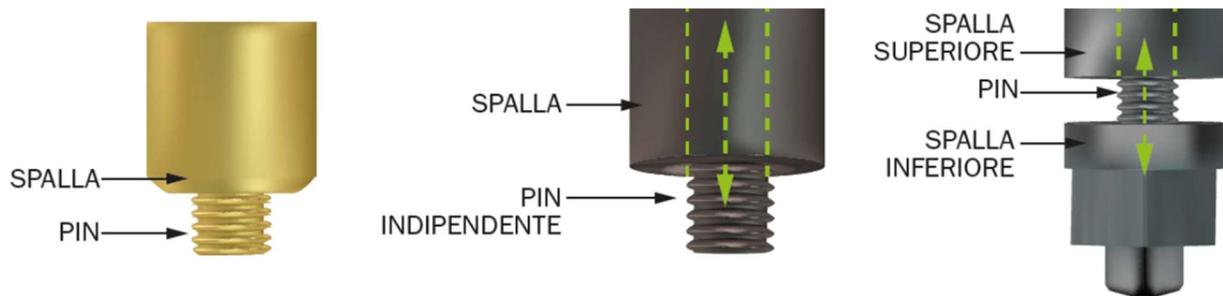


Figura 1.4: differenti tipologie di utensili dedicati alla realizzazione di una saldatura FSW. [11]

2. Procedure Sperimentali

In questo capitolo verranno descritte come sono state svolte le attività di tirocinio presso i laboratori dell'Università.

Nella prima parte si parlerà delle prove di creep in termini generali; quindi, riferendoci alle condizioni in cui sono state svolte, descrivendo il macchinario e tutti i dispositivi che sono stati utilizzati poi per raccogliere dati e rappresentarli sottoforma di diagrammi e grafici.

Nella seconda parte invece descriveremo la parte di attività relativa alle prove di micro-durezza e macro-durezza sulle parti specifiche del provino usato nelle prove svolte in precedenza.

2.1 Prove di Creep

Dopo aver definito dunque cosa è il creep e quale è il materiale sottoposto alle prove, descriviamo quali sono i passaggi fondamentali delle prove di creep.

Le prove di creep servono a valutare e calcolare gli effetti dovuti alla temperatura e alle sollecitazioni applicate ai materiali sulla velocità di deformazione $\dot{\epsilon}$. Queste prove possono essere svolte sia con sforzi di intensità diversi ma con temperatura costante sia imprimendo sollecitazioni costanti nel tempo ma a temperature diverse.

L'insieme delle normative di riferimento da rispettare durante lo svolgimento delle prove di creep racchiude:

1. ISO/DIS 204. Metallic materials - Uniaxial creep testing in tension - Method of test
2. BS EN 10291. Metallic Materials - Uniaxial Creep Testing in Tension.
3. BS 3500 Methods for Creep and Rupture testing of Metals.
4. ASTM E139. Conducting Creep, Creep Rupture and Stress Rupture Tests of Metallic Materials.
5. BS EN ISO 899. Plastics - Determination of Creep Behaviour.
6. BS EN 761. Creep Factor Determination of Glass Reinforced thermosetting Plastics-Dry Conditions.
7. BS EN 1225. Creep Factor Determination of Glass Reinforced thermosetting Plastics - Wet Conditions. [6]

La prova di creep viene realizzata con una macchina molto simile a quella destinata alla prova di trazione. I provini utilizzati possono essere:

- a sezione rettangolare, con la condizione secondo la quale il rapporto tra i lati non deve essere più di 4:1 e che il lato minore sia più grande di 2 mm;
- a sezione circolare, la quale non deve essere minore di 4mm. [6]

Questi provini vengono montati su degli appositi supporti o afferraggi e poi mediante l'applicazione di pesi viene imposto uno sforzo e quindi uno stato tensionale.

La deformazione viene misurata tramite dei sensori come i trasduttori di spostamento. Nel caso delle macchine del laboratorio, sono utilizzati gli LVDT (Linear Variable Displacement Transducer).

La temperatura a cui si trova il provino durante l'esecuzione della prova, viene regolata dal forno (a resistenze) a 3 zone, controllate da 3 termocoppie distinte.



Figura 2.1 e 2.2: Foto della macchina realizzate durante la visita nei laboratori

I dati raccolti durante la prova vengono poi inviati ad un software di gestione dati, esempio un computer, che permette quindi di monitorare la situazione generale e poi elaborare i grafici o diagrammi necessari, che vedremo in seguito.

La prova termina con la rottura del provino oppure la prova può essere interrotta quando il materiale entra nello stadio del Creep Terziario, che lo stato è antecedente alla rottura.

Per un qualsiasi materiale al termine della prova, è possibile ricavare la cosiddetta “Curva di Creep”.

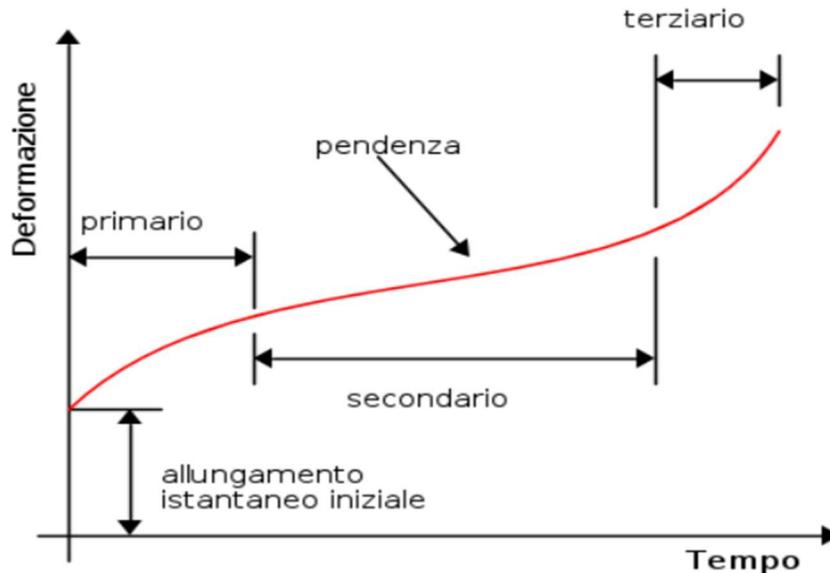


Figura 2.3: esempio di curva di creep. Fonte [12]

Dalla figura, è possibile osservare che ci sia un immediato allungamento iniziale. Dopo questa prima fase, la deformazione continua ad aumentare in funzione del tempo t fino alla rottura, dove si interrompe anche la curva. La deformazione totale corrisponde alla seguente espressione:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \varepsilon(\sigma, t, T)$$

Sempre dalla figura in cui è riportato l'esempio di curva è possibile distinguere:

- creep primario, durante il quale la velocità di deformazione diminuisce e in questa fase le molteplici dislocazioni rendono difficile la deformazione;
- creep secondario o stazionario, nel quale la velocità assume un valore costante;
- creep terziario, dove la velocità di deformazione tornerà ad aumentare fino a rottura.

Per quanto detto, uno dei parametri più rilevanti è la velocità di deformazione, definita come:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt}$$

Altro parametro, che è il più semplice da calcolare, è il tempo a rottura. Questo può essere calcolato direttamente con la deformazione secondo la relazione:

$$\dot{\varepsilon} * t_R = C_R$$

dove C è una costante.

Questa equazione combinata con la power-law o legge di potenza, relazione che lega la velocità di deformazione alla tensione di prova, espressa come:

$$\dot{\varepsilon}_{ss} = A \left(\frac{b}{d}\right)^p \left(\frac{\sigma}{G}\right)^n \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right)$$

Dalla combinazione di esse, otteniamo:

$$t_R \propto \sigma^n \exp\left(\frac{Q}{RT}\right)$$

Una soluzione alternativa è rappresentata dall'approccio parametrico, in particolare quello di Larson-Miller (LMP), il quale si basa sulla dipendenza della vita a rottura dalla temperatura e dalla tensione, espressa da:

$$t_R = B_0 \exp\left[\frac{Q(\sigma)}{RT}\right]$$

2.2 Prove di Durezza

Con questa seconda parte di prove sperimentali abbiamo cercato di definire le caratteristiche meccaniche dell'acciaio in questione.

La durezza viene definita in diversi modi.

Quando si parla di “durezza metallurgica” si intende la resistenza che un materiale oppone alla penetrazione ed infatti nelle diverse tipologie di prove che elencheremo in seguito viene misurata tramite l'azione di un penetratore di varie forme.

In generale tutte le prove di durezza sono caratterizzate dall'uso di un penetratore, realizzato con materiale duro. Tramite di esso viene applicato un carico e alla sua rimozione si ottiene un'impronta che, se misurata correttamente, fornisce il valore di durezza del provino.

Le prove più utilizzate sono:

- prova di Brinell (HB);
- prova di Vickers (HV);
- prova di Rockwell (HR);
- prova di Knoop (HK).

Tutte queste si differenziano a seconda del tipo di penetratore, delle condizioni di prova e delle modalità di calcolo e determinazione della durezza.

Le prove di micro-durezza si effettuano con carichi molto piccoli e soprattutto su pezzi la cui superficie è lucidata. Altra condizione è un'elevata finitura superficiale del provino. Il carico di solito può variare tra 1 e 1000 g. [13]

Grazie a queste prove si può valutare la misura della durezza di un'area del campione molto ridotta. Questo permette di misurare la durezza delle singole fasi o dei costituenti strutturali. I valori di durezza sono indipendenti dal carico.

Oltre il carico, le prove seguono le stesse modalità delle prove di macrodurezza o semplicemente durezza. Dunque, la nostra prova di micro-durezza di Vickers segue le regole generali.

In una prova di Vickers il penetratore che realizza l'impronta è di diamante a forma di piramide retta a base quadrata con angolo al vertice di 136° . Tramite un microscopio vengono rilevate le dimensioni dell'impronta e grazie alla seguente formula si può calcolare la durezza in termini Vickers HV:

$$HV = \frac{2 * 0.102 * P}{d^2} \sin(136^\circ/2) = 0.1891 \frac{P}{d^2}$$

dove P è il carico applicato in N e d è la media dei valori delle diagonali dell'impronta in mm. [7]

Nell'attività in laboratorio abbiamo preso uno dei provini di AiSi316L saldato per FSW sottoposto alla prova di creep e ne abbiamo rimosso la testa attraverso una troncatrice, in quanto la prova di micro-durezza riguarda il tratto utile del campione.

Dopo aver fatto ciò, abbiamo inglobato il provino grazie all'utilizzo della macchina presente in laboratorio (fig.2.4).

La macchina è stata impostata per lavorare ad una temperatura di 150°C ed una pressione di 25 kN. Una volta disposto il provino all'interno, la macchina viene riempita con della resina fenolica termoindurente.

La macchina comincia il ciclo di inglobamento funzionando per 7 minuti ad una temperatura di 150°C. Subito dopo per un tempo di 5 minuti e senza calore, viene aperta la valvola del sistema di raffreddamento che introduce l'acqua.



Figura 2.4: Macchina per l'inglobamento del campione

Dopo questo passaggio, il campione inglobato deve essere sottoposto a un ciclo di lucidatura per rendere il provino disponibile senza asperità e rugosità alla prova di micro-durezza.

La fase di lucidatura viene realizzata su delle lucidatrici con fogli abrasivi di diversa granulometria.



Figura 2.5: Due dei quattro piatti utilizzati nella sgrossatura del campione

Sono stati utilizzati consecutivamente quattro piatti diversi, ciascuno con un foglio abrasivo con grado granulometrico crescente. Nel passaggio tra un piatto e l'altro, un passaggio chiave è la rotazione di 90° per una lucidatura il più ottimale e uniforme possibile del campione.

La finezza di una carta abrasiva è indicata da un numero detto *grana* stampato sul retro del foglio. Più è alto il numero più è fine l'abrasivo e più liscia sarà la finitura. In particolare, il numero usato corrisponde, grosso modo, al numero di maglie che un setaccio, usato per separare la polvere abrasiva, ha per pollice quadrato.

I numeri di grana, secondo la classificazione della federazione europea produttori di abrasivi per le carte (FEPA P), possono essere: 12, 16, 20, 24, 30, 36, 40, 50, 60, 80, 100, 120, 150, 180, 220, 240, 280, 320, 360, 400, 500, 600, 800, 1000, 1200, 1300, 1500, 2000, 2500, 3000, 4000, 5000, 6000, 7000. [14]

Dopo la lucidatura, il provino è pronto a essere sottoposto alla prova di micro-durezza Vickers.



Figura 2.6: Durometro per la prova di micro-durezza Vickers

Dopo aver posizionato il provino sui supporti, abbiamo eseguito la prova che, come già detto all'inizio di questo paragrafo, è eseguita con un penetratore a forma di piramide con angolo al vertice di 136° .

Una volta realizzata l'impronta, grazie alla lente del microscopio ottico e al software nel computer, possiamo acquisire l'immagine di ogni impronta e misurare i valori medi delle diagonali. Questi valori saranno poi importanti perché ci permettono di calcolare il valore di HV, riportandoli nel foglio di calcolo Excel.

Nel caso della nostra prova il carico applicato è di 200 gf per un tempo di 10 s.

Dopo aver completato la prova di micro-durezza, è stata realizzata la prova di durezza sulle teste del campione.

La prova effettuata è stata una prova di Rockwell di tipo B (HR B), con il macchinario riportato nella figura seguente.



Figura 2.7: Macchina per la prova di durezza HR B.

La prova di Rockwell è una prova che si distingue dalle altre elencate in precedenza, perché la durezza non viene formulata in termini di pressione specifica ma in termini di profondità dell'impronta realizzata ovviamente dal penetratore.

Questa categoria di prove utilizza differenti scale in base all'entità del carico applicato e alla forma e alla dimensione del penetratore. Nel nostro caso essendo la scala B si tratta di un penetratore a sfera levigata in carburo di tungsteno.

Per il calcolo di durezza di Rockwell, l'espressione è la seguente:

$$HR = N - \frac{h}{s}$$

Dove N è una costante, h rappresenta la penetrazione ed s è un'altra costante del fattore di scala. [7]

La norma prevede che dopo il simbolo HR ci sia indicata anche la scala di riferimento, come vedremo nella parte relativa ai risultati.

3. Risultati Sperimentali

Dopo aver illustrato i concetti di base su cui si fondano le attività e le prove svolte presso i laboratori dell'università, passiamo a descrivere i risultati derivanti appunto dalle prove svolte.

Come già detto nei paragrafi precedenti, le prove di creep possono essere svolte in condizione di carico costante o variabile e generalmente a temperatura costante. Nel nostro caso specifico una delle due prove è stata svolta con carico costante, pari a 350 MPa, e l'altra invece il valore di partenza di 380 MPa è stato aumentato a 400 MPa, mentre la temperatura è stata sempre di 550°C.

Relativamente alle prove di micro e macro-durezza, rimandiamo al paragrafo 2.2, dove abbiamo illustrato tutte le varie fasi di preparazione e svolgimento delle attività. Qui, riporteremo i risultati e li confronteremo per mettere in evidenza le caratteristiche più rilevanti.

3.1 Curve di Creep

Le prove di Creep effettuate sono due. Nella prima la prova è stata svolta a carico costante, mentre la seconda partendo da un certo carico di partenza è stato aumentato.

Le prove sono state eseguite su provini di lunghezza di 25 mm.

I dati sono stati raccolti tramite un foglio di calcolo Excel, attraverso il quale poi sono stati realizzati i seguenti grafici per ogni prova:

- i. grafico deformazione-tempo;
- ii. grafico vel. di deformazione-tempo;
- iii. grafico semi-logaritmico vel. di deformazione-deformazione;
- iv. grafico bi-logaritmico vel. di deformazione minima-tensione, che vedremo al punto 3.2.

Qui di seguito riporto un esempio della tabella di raccolta dati. (tab.3.1)

550°C	350MPa		
t (s)	allung. [mm]	def.[mm]	vel. di def.[1/s]
0	0	0	
1681,98	0,008	0,00032	1,4E-07
5581,98	0,019	0,00076	1,1E-07
9181,98	0,028	0,00112	9,0E-08
13981,98	0,038	0,00152	8,0E-08
21181,98	0,052	0,00208	6,7E-08
30781,98	0,066	0,00264	4,2E-08
48781,98	0,081	0,00324	2,3E-08
78781,98	0,094	0,00376	1,7E-08
114782	0,109	0,00436	1,7E-08
150782	0,125	0,005	1,5E-08
186782	0,136	0,00544	1,1E-08
222782	0,145	0,0058	1,0E-08
270782	0,157	0,00628	1,1E-08
306782	0,169	0,00676	9,7E-09
361402	0,179	0,00716	

Tabella 3.1: tabella di raccolta dati della prima prova di creep

Prova n.1

Come già detto in precedenza e da come si può osservare dalle indicazioni presenti nella tabella 3.1, questa prima prova è stata effettuata in condizioni di lavoro costanti. Più precisamente, intensità del carico pari a 350 MPa e temperatura di 550°C

Dai dati ricavati durante le prove e che sono riportati nella tabella precedente (tab.3.1), si ottengono i seguenti grafici:

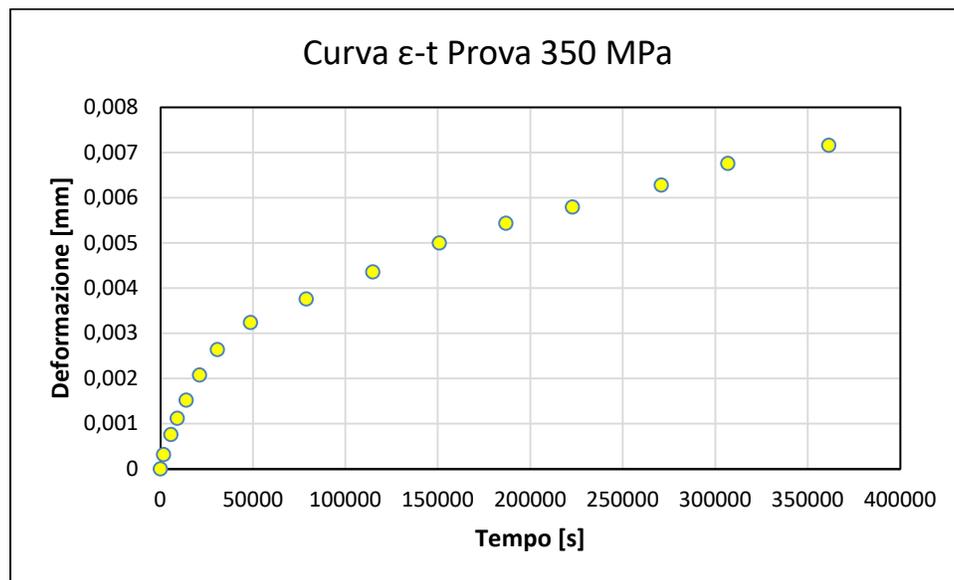


Figura 3.1: Grafico deformazione-tempo Prova 1

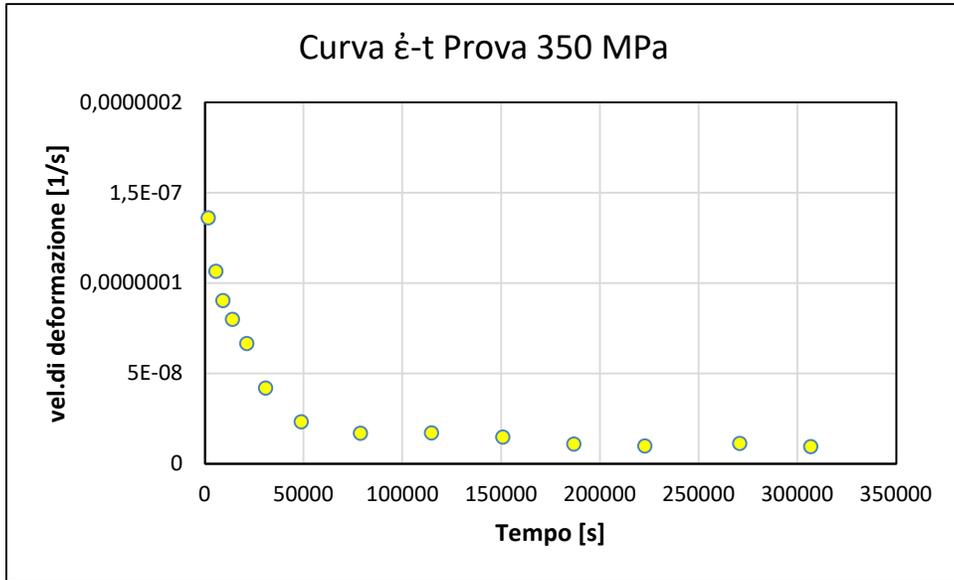


Figura 3.2: Grafico vel. di deformazione-tempo

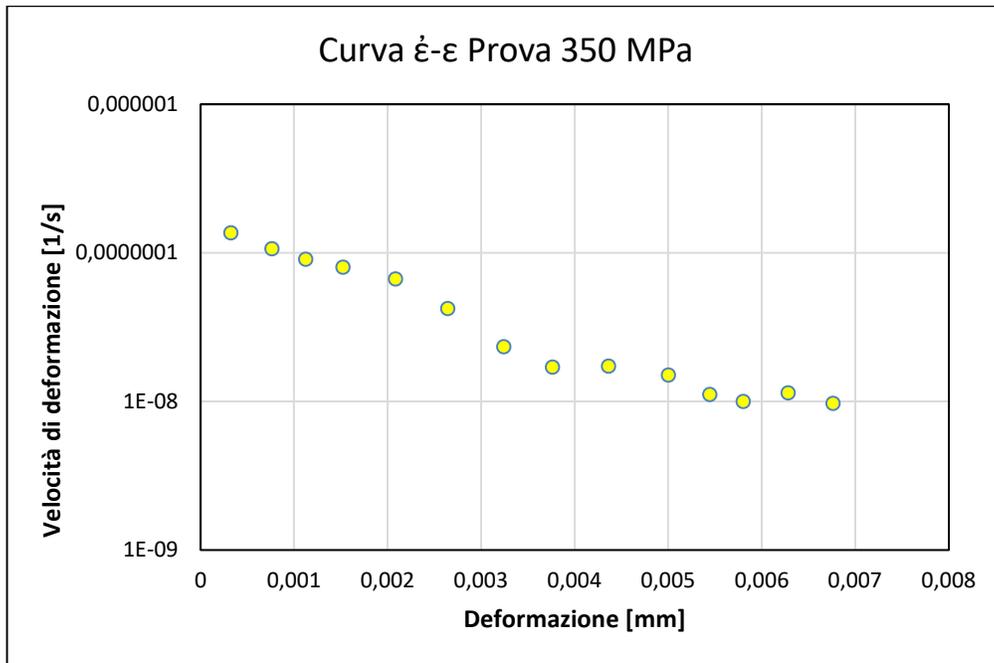


Figura 3.3: Grafico semi-logaritmico vel. di deformazione-deformazione

Dalla figura 3.1, è abbastanza evidente l'osservazione di un andamento crescente della deformazione in funzione del tempo.

Dalla figura 3.3, invece, ci permette di individuare il punto di minimo, cioè la velocità di deformazione minima, che si rivelerà di particolare importanza nel paragrafo seguente (3.2).

Prova n.2

Questa seconda prova è stata invece eseguita in condizioni di carico variabili, mentre la temperatura di 550°C è rimasta invariata.

Il carico iniziale applicato è stato di 380 MPa, all'istante di tempo $t=415942,02$ s il carico è stato aumentato a 400 MPa.

I dati ricavati e riportati nel foglio Excel hanno prodotto i seguenti diagrammi:

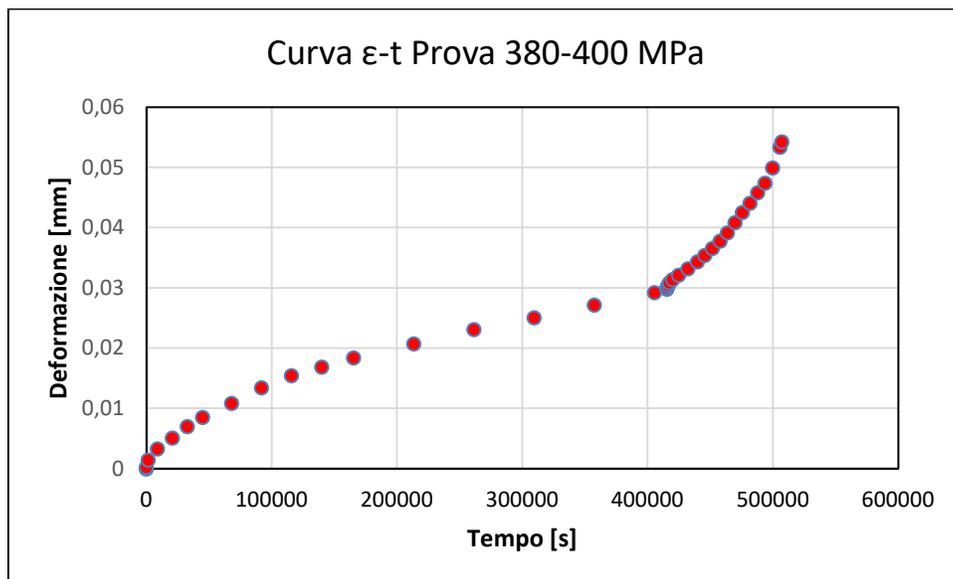


Figura 3.4: Grafico deformazione-tempo Prova 2

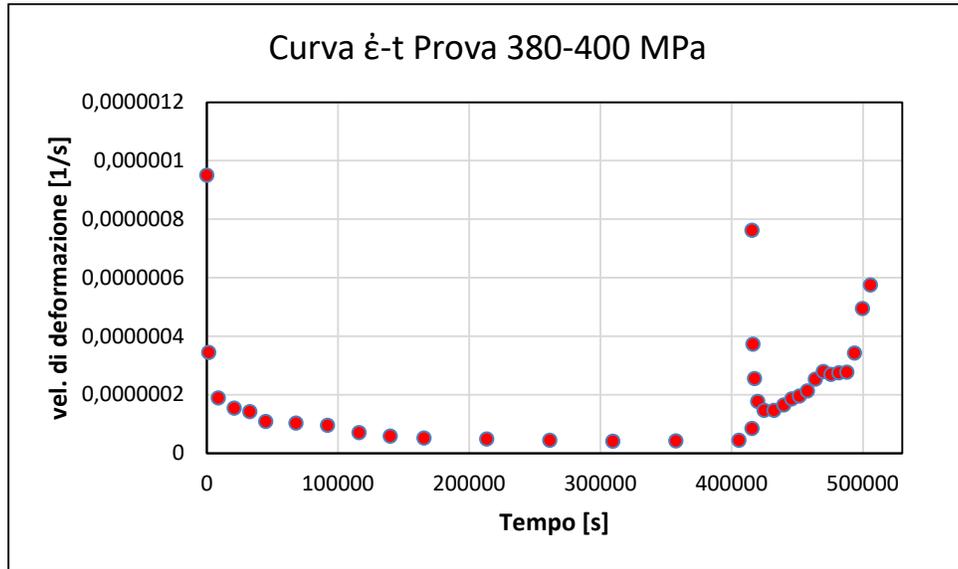


Figura 3.5: Grafico vel. di deformazione-tempo Prova 2

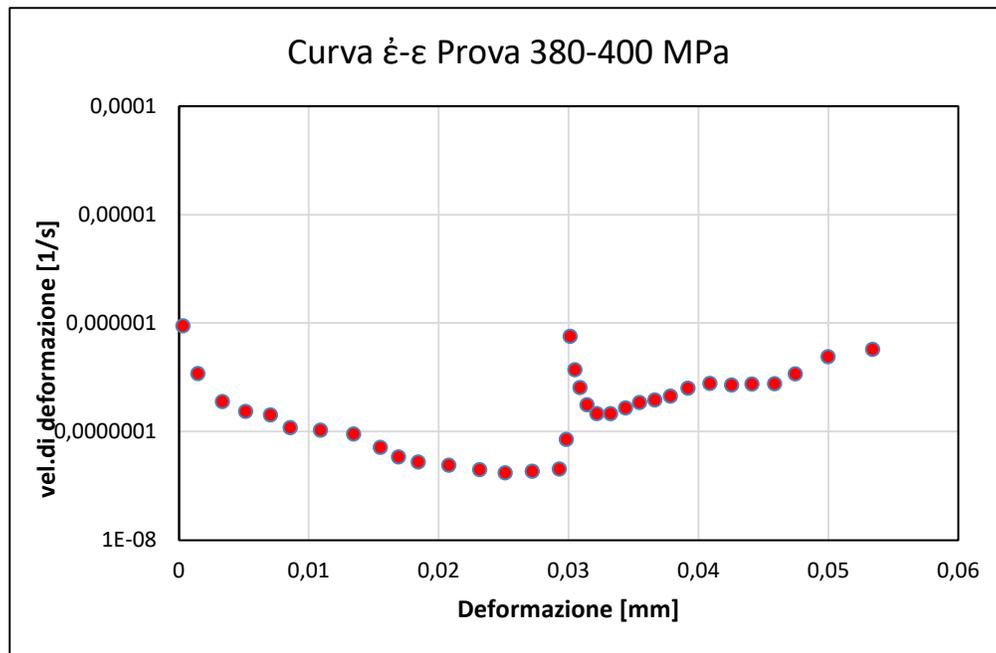


Figura 3.6: Grafico vel. di deformazione-deformazione Prova 2

A differenza della prova n.1, questa è caratterizzata dall'aumento del carico applicato e nella figura 3.4 si può osservare e individuare il momento esatto in cui c'è questa variazione.

Sempre nella raccolta dati e quindi anche nei grafici, sono state sottratte tutte le deformazioni elasto-plastiche istantanee sia al momento del primo caricamento che del secondo.

3.2 Dipendenza della velocità minima di deformazione dalla tensione di prova

Questo paragrafo descrive la discussione della risposta a creep dei provini di AiSi316L saldato per Friction-Stir Welding.

In questa parte dell'elaborato, l'obiettivo principale è stato quello di determinare la relazione costitutiva tra la velocità di deformazione e la tensione di prova.

Come già detto, una curva di creep può essere suddivisa in tre stadi o fasi. Di queste la fase secondaria è quella più importante e con questo elaborato si cerca di dare più informazioni possibili.

Il secondario può essere paragonato allo stazionario nella curva σ - ϵ , ottenuta facendo una prova a velocità di deformazione costante.

La legge di potenza o legge di Bailey-Norton o semplicemente di Norton permette quindi di relazionare la velocità di deformazione alla tensione di prova.

$$\dot{\epsilon}_{ss} = B\sigma^n$$

dove B è un coefficiente dipendente dalla temperatura e n è l'esponente che determina il comportamento a creep che per i metalli puri è circa 4-5.

Da questa relazione è possibile poi rappresentare attraverso un grafico bi-logaritmico tra velocità di deformazione e tensione di prova, dove sarà realizzata nel nostro caso una retta isoterma che passa per i punti individuati, la cui pendenza sarà proprio l'esponente "n".

Nella seguente tabella sono riportati i valori minimi della velocità di deformazione in funzione della tensione in MPa.

Tabella 3.2: valori per la determinazione della legge di potenza

Tensione [MPa]	val. minimi [1/s]
350	9,7E-09
380	4,2E-08
400	1,5E-07

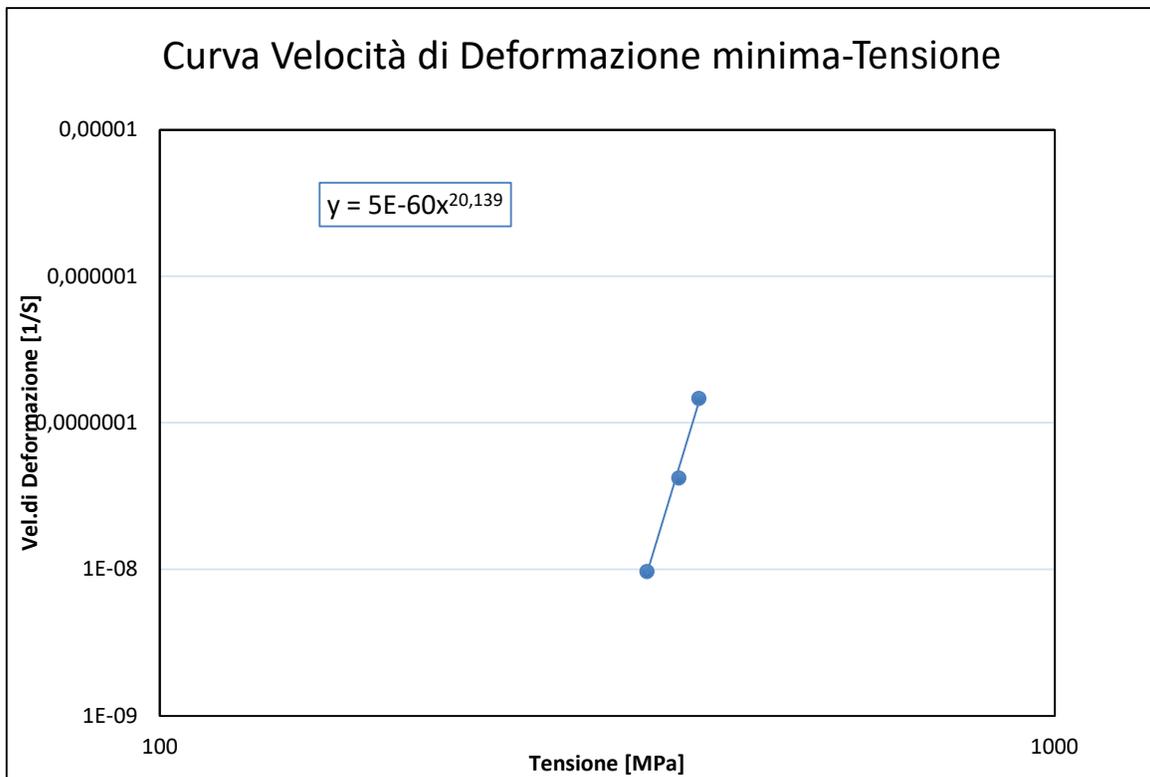


Figura 3.7: Grafico Bi-logaritmico vel. di deformazione minima-tensione

Confrontando l'equazione scritta in precedenza ($\dot{\epsilon}=B\sigma^n$) con quella ricavata nel grafico attraverso l'interpolazione dei dati con una linea di tendenza, possiamo dire che:

$$B = 5 * 10^{-60}$$

$$n = 20,1$$

Il valore di B descrive il comportamento a creep dell'acciaio alla temperatura di 550°C, mentre n rappresenta il comportamento o la sensibilità alle variazioni di carico.

Volendo dare un significato e un metro di paragone consideriamo i risultati provenienti dalle prove effettuate dal "Institute fur Materialforschung". [15]

In particolare, per la temperatura di 500°C sono stati registrati i valori di velocità minima di deformazione [1/s] in funzione sempre della tensione di prova e vengono riportati nella seguente tabella 3.3.

sigma (MPa)	vel.min.def. (1/s)
380	1,8E-07
360	5,6E-08
340	1,4E-08
320	4,4E-08
300	8,9E-10
260	1,1E-09
250	5,8E-10
240	2,8E-10
210	2,2E-10

Tabella 3.3: Valori della prova [15]

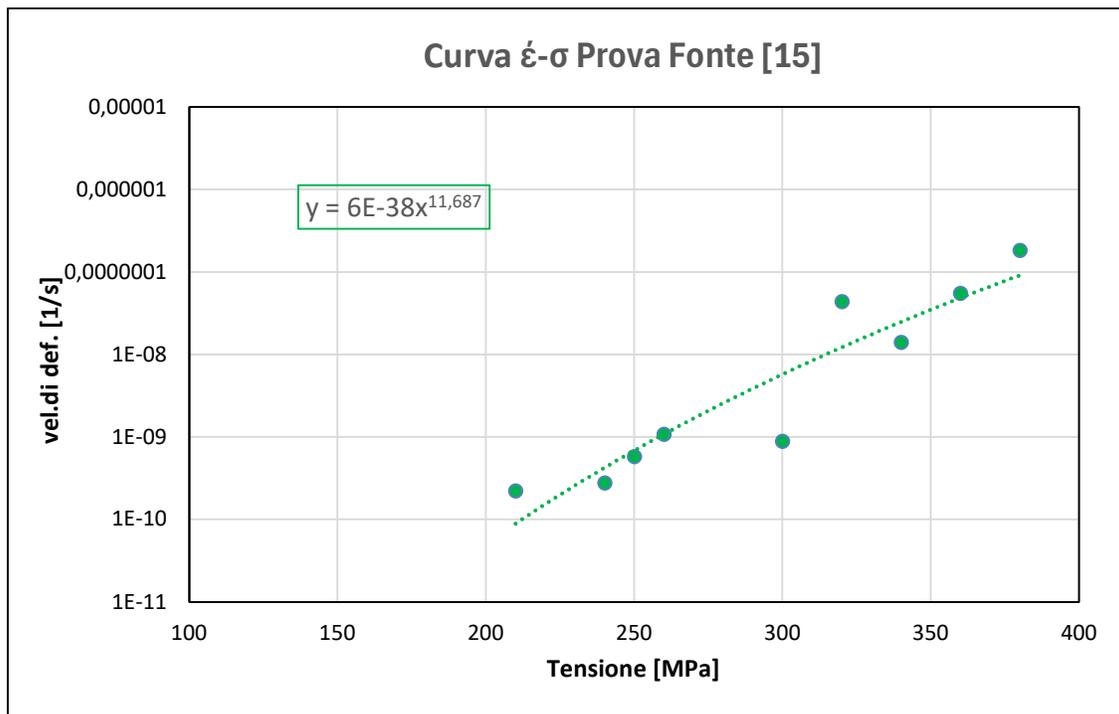


Figura 3.8: Grafico Bi-logaritmico vel. di deformazione minima-tensione Prova [15]

Dalla figura 3.8, come nel caso delle nostre prove, a partire dai dati della tabella 3.3 si può ricavare la legge di potenza interpolando i dati presenti nella tabella precedente con una linea di tendenza.

I Coefficienti della legge di Norton sono:

$$B = 6 * 10^{-38}$$

$$n = 11,7$$

Confrontando quindi i risultati ottenuti nelle due situazioni, è possibile osservare quanto il materiale AISI316L viene particolarmente influenzato.

Nella prova [15] il coefficiente che dipende dalla temperatura “B” è maggiore rispetto alle nostre prove; dunque, è possibile affermare che l’AISI316L risulta essere più sensibile alla temperatura di 500°C.

Mentre l’esponente a creep, il coefficiente “n”, risulta essere più grande nelle due prove svolte in laboratorio descrivendo dunque una maggior dipendenza dal carico.

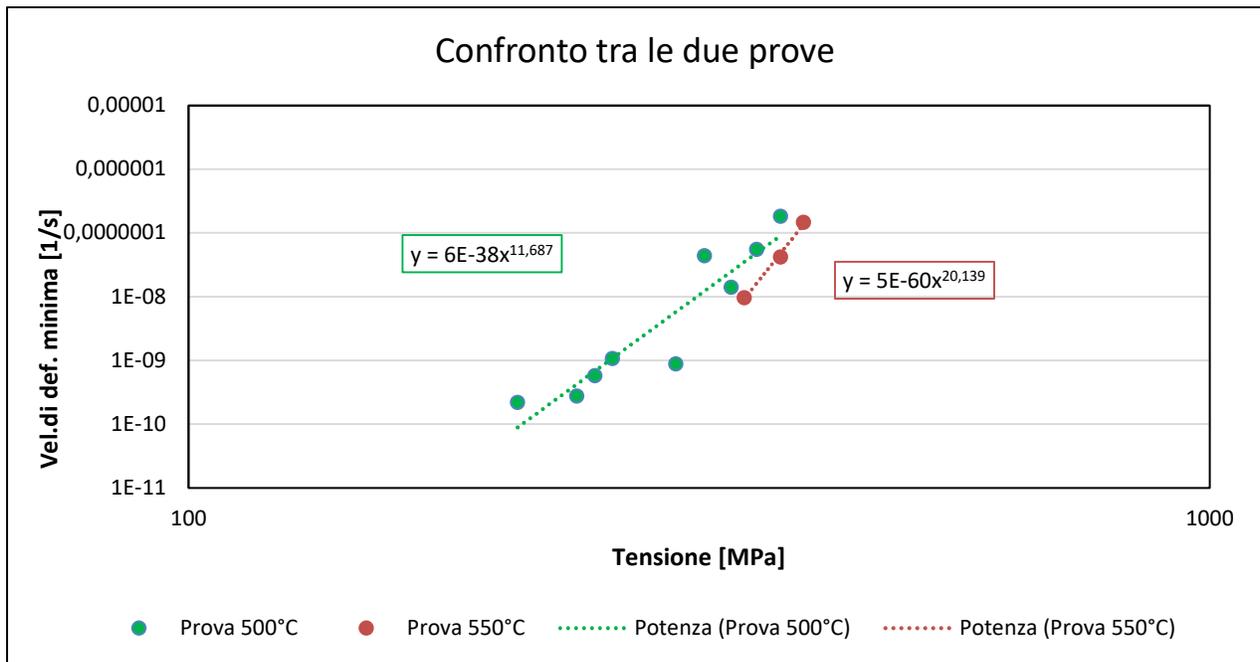


Figura 3.9: Grafico in cui si confrontano le due prove

3.3 Prova di micro-durezza

Dopo aver spiegato la procedura sperimentale nel capitolo 2 e in particolare nel paragrafo 2.2, in questa parte dell'elaborato riportiamo i valori di HV estrapolati dalla prova di Vickers.

Come già detto, la prova è stata realizzata con l'ausilio del vecchio durometro e con un carico applicato di 200 gf per un intervallo di tempo di 10 s.

Inoltre, la prova è stata realizzata sul tratto utile del campione. Le impronte lasciate dal penetratore della prova sono state realizzate con un intervallo di circa 0,5 mm, con qualche possibile scostamento in corrispondenza di graffi o irregolarità che abbiamo potuto osservare grazie alla lente del microscopio ottico.

Una volta acquisita l'immagine dell'impronta e calcolato il valore medio delle diagonali, riportando proprio tale valore nel foglio di calcolo Excel otteniamo il valore medio di HV pari a 240.

Qui, riportiamo i valori raccolti dal software (tab.3.4)

Diagonale	HV	MPa	GPa	Diagonale	HV	MPa	GPa
153	252	2474	2,47	157	240	2354	2,35
156	243	2381	2,38	154	250	2455	2,45
173	199	1950	1,95	156	242	2377	2,38
176	192	1884	1,88	160	233	2283	2,28
153	254	2488	2,49	152	255	2503	2,50
156	245	2399	2,40	154	249	2438	2,44
154	249	2438	2,44	190	164	1612	1,61
153	254	2488	2,49	157	241	2362	2,36
156	244	2392	2,39	153	253	2479	2,48
151	260	2549	2,55	156	245	2405	2,41
154	249	2446	2,45	150	262	2574	2,57
154	249	2446	2,45	172	201	1972	1,97
155	248	2432	2,43	168	210	2063	2,06
156	243	2387	2,39	150	264	2586	2,59
152	258	2532	2,53	148	270	2652	2,65
161	228	2241	2,24	156	244	2391	2,39
164	221	2164	2,16				
157	242	2373	2,37				

Tabella 3.4: Valori di micro-durezza Vickers registrati

3.4 Prova di Durezza

In conclusione, abbiamo preso in considerazione le teste del campione e svolto una prova di macro-durezza proprio sulle teste.

La prova in questione è la prova di Rockwell scala B.

Nella tabella seguente, vengono riportati i valori delle tre misurazioni fatte con un carico applicato di 100kg per un tempo di 10s.

Prova di Durezza Rockwell B		
Tre misure sulla testa del campione	carico 100kg	
1	84	HR-B
2	85	HR-B
3	85	HR-B

Tabella 3.5: Valori della prova di Rockwell

Facendo alcune ricerche su dei cataloghi disponibili, ad esempio la durezza di un acciaio inox 316 o 316L è di circa 90 HR-B. [16]

Altre fonti, come nel paragrafo 1.2 relativo al materiale nella tabella delle caratteristiche meccaniche, assegnano un valore massimo di durezza HR-B pari a 79 HR-B. [17]

Dunque, possiamo dire che a livello di macro-durezza sulle teste del provino la prova di creep a 550°C, rivela un valore intermedio (85 HR-B) fra quelli normalmente riportanti in letteratura (79-90 HR-B).

Confrontando tale valore con i risultati provenienti dal paragrafo 3.3, possiamo dire che i valori di micro-durezza misurati sul tratto utile sono maggiori rispetto ai valori di durezza delle teste. Infatti, convertendo il valore medio di durezza Vickers (240 HV), riportato nella tabella del paragrafo 3.3, in termini di durezza Rockwell B si ottiene un valore di 99 HR-B.

Questo fenomeno può essere spiegato dal fatto che la deformazione da creep interessa maggiormente il tratto utile, nel quale si concentrano il maggior numero di dislocazioni, cosa che ha come conseguenza proprio l'aumento della durezza del materiale. Di particolare interesse il fatto che il tratto utile non manifesta grandissime variazioni della micro-durezza, nonostante il fatto che in quella zona sia presente il giunto di saldatura.

4.Conclusioni

Questo elaborato, insieme alle attività svolte nei laboratori, ha avuto come obiettivo primario il cercare di capire come reagisca un acciaio inossidabile AISI316L saldato con la tecnica del Friction Stir-Welding.

Innanzitutto, già nel paragrafo 1.2 relativo al materiale in tutti i suoi aspetti generali, è stato detto che è un materiale facente parte del gruppo di acciai inox austenitici. In commercio è disponibile sia l'acciaio AISI316 che il 316L, che come già stato spiegato, sono caratterizzati da un minor tenore di carbonio. Questa tipologia di acciai Low-carbon viene utilizzata soprattutto durante il processo di saldatura e in zone termicamente alterate per limitare il fenomeno della sensibilizzazione. Punto cruciale per questa tipologia di acciai inossidabili austenitici è proprio la sensibilizzazione, cioè l'impoverimento localizzato di Cr (Cromo) causato dalla possibile formazione e precipitazione di carburi di Cromo nei pressi dei bordi di grano.

Dalle analisi delle prove di micro e macro-durezza è stata riscontrato una certa differenza tra i valori ricavati in un primo momento sul tratto utile e poi sulle teste del campione.

Nelle prove di micro-durezza, registrando un'impronta ogni 0,5 mm circa, abbiamo riscontrato un valore medio di 240 HV che convertiti in termini di durezza Rockwell sono 99 HR-B. Nelle prove effettuate sulle teste del campione grazie alle tre misurazioni fatte si sono ottenuti valori pari a 84,85 e 85 HR-B.

Questa differenza, come già spiegato, è dovuta al fatto che la deformazione provocata dalla prova di creep interessa maggiormente il tratto utile, dove si accumulano le dislocazioni.

Per quanto riguarda le prove di Creep, abbiamo potuto osservare l'andamento crescente della deformazione rispetto al tempo ed è stata individuata la legge di Norton o legge di

potenza, la relazione costitutiva che lega la velocità di deformazione minima alla tensione di prova.

Facendo un confronto con le prove provenienti dal “Forschungszentrum” di Karlsruhe relative ovviamente all’AISI316L, si può dire che il nostro materiale saldato per FSW risulta essere più sensibile al carico applicato, e manifesta sicuramente, per un dato carico, velocità di deformazione più basse.

Concludendo questo percorso, a partire dalle prove di Creep e di durezza, è stato possibile lo studio del comportamento dei provini di AISI316L come risposta allo scorrimento viscoso e in seguito anche sulla possibile influenza che esso ha sulle caratteristiche o proprietà meccaniche del materiale.

5. Bibliografia e Riferimenti

- [1] Bureau Veritas Spa, «Scorrimento Viscoso e Tempo di Vita dei componenti,» 2021. [Online]. Available: [https://www.bureauveritas.it/magazine/scorrimento-viscoso-e-tempo-di-vita-dei-componenti#:~:text=Tradotto%20dall'inglese%20creep%20\(parola,o%20a%20sollecitazioni%20dovute%20al%20peso.](https://www.bureauveritas.it/magazine/scorrimento-viscoso-e-tempo-di-vita-dei-componenti#:~:text=Tradotto%20dall'inglese%20creep%20(parola,o%20a%20sollecitazioni%20dovute%20al%20peso.)
- [2] «Vettore di Burgers,» Wikipedia, 16 Ottobre 2023. [Online]. Available: https://it.wikipedia.org/wiki/Vettore_di_Burgers.
- [3] S. Spigarelli, «"Comportamento dei materiali ad alta temperatura: lo scorrimento viscoso (creep),» Milano, 2003.
- [4] «Scorrimento Viscoso,» Wikipedia, 17 Ottobre 2023. [Online]. Available: https://it.wikipedia.org/wiki/Scorrimento_viscoso.
- [5] Meccanica News, «Il creep o scorrimento visco,» 14 Giugno 2023. [Online]. Available: <https://www.meccanicaneWS.com/2023/06/14/il-creep-o-scorrimento-viscoso/>.
- [6] N. Bonara, «Lecture 13 - Introduzione al Creep,» 2016. [Online]. Available: https://www.cdmunicas.it/notes/CDM2016/Lecture13_Creep1.pdf.
- [7] S. Barella e A. Gruttadauria, Metallurgia e Materiali non metallici, Esculapio, 2017.
- [8] Sidermariotti srl, «Scheda Tecnica AiSi316L,» [Online]. Available: <https://www.sidermariotti.it/acciaio-inox/austenitici/316l.html>.
- [9] «Saldatura,» Wikipedia, 2024. [Online]. Available: <https://it.wikipedia.org/wiki/Saldatura>.
- [10] Meccanica News, «Friction Stir Welding: la saldatura proiettata verso il futuro,» Meccanica News, 6 Luglio 2022. [Online]. Available: <https://www.meccanicaneWS.com/2022/07/06/friction-stir-welding-la-saldatura-proiettata-verso-il-futuro/>.
- [11] Meccanica News, «Friction Stir Welding: stato dell'arte e applicazioni,» Meccanica News, 9 Maggio 2019. [Online]. Available: <https://www.meccanicaneWS.com/2019/05/09/friction-stir-welding/>.
- [12] ElectroYou, «Il creep dei materiali metallici - Prove di creep,» 2011. [Online]. Available: <https://www.electroyou.it/asdf/wiki/i-materiali-compositi>.
- [13] A. Fabrizi, «Le prove di durezza e micro-durezza,» [Online]. Available: https://stem.elearning.unipd.it/pluginfile.php/346263/mod_resource/content/1/Durezza%20e%20microdurezza_Fabrizi.pdf.

- [14] Wikipedia, «Carta Abrasiva,» [Online]. Available: https://it.wikipedia.org/wiki/Carta_abrasiva.
- [15] R. M., F. A., G. P. e .. et al., « Creep of the austenitic steel AISI 316 L(N). Experiments and models. Research Center Karlsruhe GmbH Technology and Environment (Germany). Institute for Materials Research - Nuclear Fusion program, Report FZKA-7065,» Novembre 2004. [Online]. Available: <https://d-nb.info/973572558/34>.
- [16] «Gnee Stainless Steel-Tabella di durezza dell'Acciaio Inossidabile,» [Online]. Available: <https://it.stainless-pipe-fitting.com/info/stainless-steel-hardness-chart-83338221.html>.
- [17] Centro Inox, «Raccolta di Tabelle Tecniche,» [Online]. Available: <https://www.centroinox.it/sites/default/files/pubblicazioni/245A.pdf>.